

شبیه سازی اثر تنش برشی امواج فراصوت در رسوب زدایی لوله ۲ اینچ فولادی

میثاق ابرون^ا، محمدحسین سورگی^{ب*}

^ا ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، ۱۶۵۸۹-۵۳۵۷۱، دانشجوی کارشناسی ارشد.

^ب ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، ۱۶۵۸۹-۵۳۵۷۱، استادیار گروه طراحی کاربردی.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mh_soorgee@sbu.ac.ir

چکیده

رسوب زدایی در سامانه های لوله کشی و مبدل های حرارتی یکی از چالش های اساسی صنایع فرایندی به شمار می رود. استفاده از امواج فراصوت توان بالا به عنوان روشی نوین، غیرشیمیایی و بدون نیاز به حفره زایی (کاویتاسیون)، به دلیل ایجاد تنش های برشی و ارتعاشات موضعی در سطح مشترک رسوب و جداره داخلی لوله، مورد توجه قرار دارد. در این پژوهش، یک لوله فولادی با قطر ۲ اینچ در دو حالت دارای رسوب با ضخامت ۰/۵ و ۱ میلی متر، در بازه فرکانسی ۳۰ تا ۴۰ کیلوهرتز به روش اجزا محدود مورد تحلیل فرکانسی قرار می گیرد. با استخراج مد $L(0,1)$ و استفاده از منحنی پاشندگی، طول موج و عرض مناسب ثابت نگهدارنده تعیین می شود. سپس مبدل فراصوت توان بالا با فرکانس تشدید ۳۵/۶۶ کیلوهرتز طراحی شده و مجموعه لوله، مبدل و ثابت نگهدارنده در حوزه فرکانس تحلیل می گردد. نتایج نشان می دهد که افزایش ضخامت رسوب موجب کاهش اندک در فرکانس تشدید و افت محسوس در اثر تنش برشی ناشی از امواج فراصوت توان بالا است. همچنین، استفاده از آرایش یک، دو، چهار و شش مبدل در اطراف لوله نشان می دهد که در حالت رسوب ۰/۵ میلی متر و با یک مبدل، مقدار بیشینه تنش برشی حدود ۶/۷ مگاپاسکال در فرکانس ۳۳/۳۵ کیلوهرتز است. بنابراین، با این روش می توان آستانه جدایش رسوبات از جداره لوله را تعیین کرد.

کلمات کلیدی: رسوب زدایی لوله؛ امواج هدایت شده فراصوت؛ منحنی پاشندگی؛ تنش برشی بین لایه ای

۱- مقدمه

صنایع پتروشیمی، پالایشگاه ها، کارخانه های مواد معدنی، نیروگاه های تولید برق و هر صنعت دیگری که از سامانه های لوله کشی و مبدل های حرارتی استفاده می کند، درگیر پدیده مخرب رسوب گذاری هستند. سیال در حال جریان در چنین تجهیزاتی، معمولاً حاوی آلودگی هایی است که منجر به تشکیل یک پوشش ناخواسته روی سطح داخلی لوله ها و مبدل های حرارتی می شود [۱، ۲]. رسوب، پدیده ای نامطلوب در دنیای انتقال حرارت و مواد است که ضریب انتقال حرارت را کاهش داده، موجب افت فشار و در برخی شرایط سبب خوردگی می گردد. گسترش خوردگی از جداره داخلی لوله می تواند به خرابی و کاهش عمر تجهیز منجر شود [۳].

از این رو، رسوب‌زدایی اقدامی اساسی و پیشگیرانه برای افزایش راندمان حرارتی، جلوگیری از اتلاف انرژی و ارتقای طول عمر سامانه‌های لوله‌کشی و مبدل‌های حرارتی به شمار می‌رود [۴].

به‌منظور تمیزکاری و رسوب‌زدایی در سامانه‌های لوله‌کشی و مبدل‌های حرارتی، متناسب با میزان سختی رسوبات از روش‌های مختلفی همچون گردش مواد شیمیایی، جت آب فشارقوی، توپک‌رانی و سوراخ‌کاری لوله‌ها با دریل استفاده می‌شود. روش توپک‌رانی برای رسوبات نرم مناسب بوده و در برخی موارد احتمال آسیب رسیدن به خط لوله وجود دارد [۵]. روش شیمیایی هرچند اثربخش است، اما مشکلاتی مانند ایمنی پایین کارکنان، اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های بالا دارد و معمولاً تنها در شرایط ضروری به کار می‌رود [۴، ۶]. جت آب فشارقوی نیز وابسته به دسترسی به لوله‌ها بوده و نیازمند توقف فرایند است؛ علاوه بر آن احتمال آسیب به تجهیزات و خطر برای کارکنان در اثر فشار بسیار بالا وجود دارد [۷]. با وجود کاربرد گسترده و سادگی نسبی روش‌های موجود، نیاز صنعت به راهکاری نوین احساس می‌شود؛ روشی که بدون اثرات زیست‌محیطی، بدون نیاز به توقف فرایند، اقتصادی در درازمدت، خودکار و ایمن باشد و مهم‌تر از همه بتواند به طور مداوم مانع تجمع رسوبات گردد. در این راستا، استفاده از فناوری‌های جدید مطرح شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها تمیزکاری با بهره‌گیری از امواج فراصوت است.

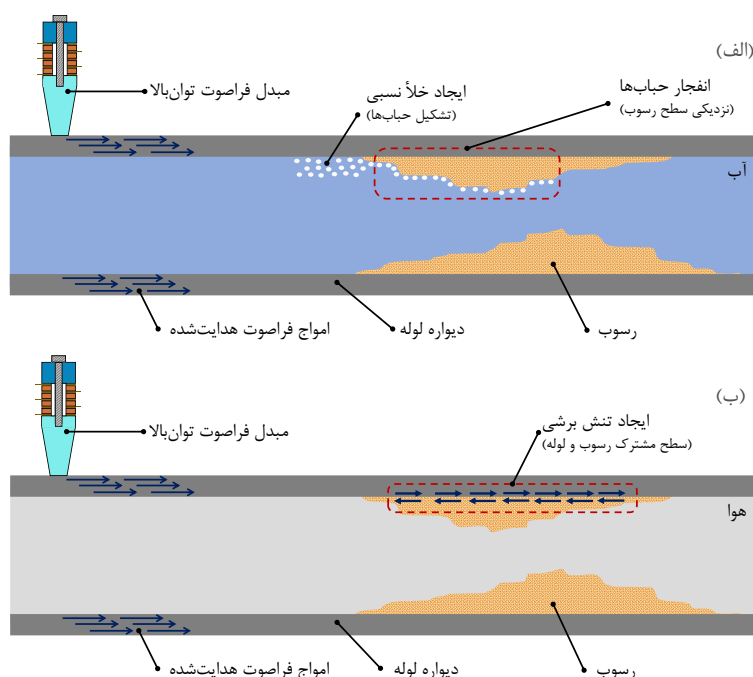
فرایند تمیزکاری با کمک امواج فراصوت توان‌بالا امروزه به دو روش رایج حمام فراصوت و اتصال مستقیم مبدل فراصوت توان‌بالا صورت می‌پذیرد. در روش حمام فراصوت، فرایند تمیزکاری قطعه موردنظر به‌وسیله ارتعاش امواج فراصوتی در یک محلول تمیزکننده (معمولاً آب) در فرکانس‌های پایین (حدود ۲۰ تا ۴۰۰ کیلوهرتز) صورت می‌گیرد. بسته به میزان آلودگی قطعه ممکن است فرایند تمیزکاری از یک تا چند دقیقه به طول انجامد. منبع اصلی تولید ارتعاشات، مبدل‌های فراصوت توان‌بالا است که در زیر مخزن تعبیه می‌شوند. اگر چه این روش در ابعاد بزرگ‌تر برای تمیزکاری مبدل‌های حرارتی و لوله‌های آن استفاده می‌شود؛ ولی نیازمند وجود یک محیط (مخزن) بزرگ و تعداد زیادی از مبدل‌های فراصوت است؛ بنابراین، کمتر به‌منظور تمیزکاری چنین تجهیزاتی استفاده می‌شود [۸، ۹]. روش دوم، یعنی اتصال مستقیم یک یا تعدادی مبدل فراصوت به لوله یا مبدل حرارتی به‌منظور تمیزکاری رسوبات تشکیل شده با تحریک امواج هدایت‌شده فراصوت در این تجهیزات است.

مهم‌ترین بخش رسوب‌زدایی با امواج فراصوت، انتخاب مکانیسمی مناسب برای کاهش زمان و هزینه عملیات است. این فرایند به دو دسته اصلی ایجاد خلأ نسبی (حفره‌زایی) و ایجاد تنش برشی تقسیم می‌شود. در روش نخست (شکل ۱-الف)، وجود سیال مایع مانند آب درون لوله ضروری است. پدیده حفره‌زایی با کاهش فشار در سیال و تشکیل حباب‌های خلأ آغاز می‌شود؛ این حباب‌ها تحت اثر موج صوتی رشد کرده و در نهایت با ترکیدن خود انرژی زیادی آزاد می‌کنند که موجب جدا شدن رسوبات از سطح می‌گردد. این پدیده، اساس رسوب‌زدایی از طریق ایجاد خلأ نسبی است [۱۰-۱۵]. در مقابل، مکانیسم دوم (شکل ۱-ب) بر پایه ایجاد تنش برشی در سطح مشترک رسوب و جداره لوله عمل می‌کند [۱۶]. به دلیل تفاوت خواص فیزیکی و امپدانس صوتی بین رسوب و دیواره لوله، انتشار و جذب موج فراصوت در آن‌ها یکسان نیست و این اختلاف سبب شکل‌گیری نیروی برشی می‌شود. ارتعاشات ناشی از امواج، تنش را در مسیرهای مختلف پخش کرده و پوسته‌پوسته شدن رسوب را در محل اتصال رقم می‌زنند که علاوه بر جلوگیری از تشکیل رسوب جدید، رسوب‌های قدیمی نیز متناسب با توان منبع و فرکانس تشدید به‌تدریج حذف خواهند شد [۱۷]. لازم به ذکر است که یکی از کاربردهای اصلی مکانیسم فوق نیز، در یخ‌زدایی لوله‌های هواپیماها و صنعت هوایی و نیز پره توربین‌های بادی استفاده می‌شود که بر اساس ایجاد تنش برشی در سطح مشترک یخ و سطح موردنظر است؛ هر چند پره توربین بادی از مواد کامپوزیت است و همین امر موجب پیچیده‌تر شدن فرایند می‌گردد، ولیکن مکانیسم اصلی یخ‌زدایی، ایجاد اثر تنش برشی است. [۱۸، ۱۹]. براین اساس، در پژوهش حاضر، مکانیسم دوم به‌عنوان رویکرد اصلی در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی اثر تنش برشی امواج فراصوت در فرآیند رسوب‌زدایی لوله‌ای با قطر ۲ اینچ موردبررسی قرار گرفته است.

۲- تعریف مسئله

هدف اصلی پژوهش حاضر، تعیین فرکانس مناسب برای رسوب‌زدایی لوله‌ها با استفاده از امواج فراصوت هدایت‌شده است. انتخاب درست این فرکانس علاوه بر کاهش زمان و هزینه، موجب افزایش کارایی و اطمینان‌پذیری نتایج می‌شود. برای این منظور دو رویکرد اصلی قابل طرح است. در رویکرد نخست، ابتدا یک مبدل فراصوت توان‌بالا طراحی شده و فرکانس تشدید آن استخراج می‌شود.

سپس مبدل روی لوله نصب و فرکانس تشدید لوله تعیین می‌گردد. باین‌حال، مشکلاتی نظیر عدم انطباق فرکانس‌های تشدید مبدل و لوله، طول زیاد لوله‌ها و عدم شکل‌گیری امواج ایستاده در طول‌های بالا، موجب افزایش هزینه محاسبات، زمان‌بر شدن فرایند و کاهش دقت نتایج می‌شود. به همین دلیل این رویکرد در پژوهش حاضر کنار گذاشته می‌شود.



شکل ۱. مکانیسم رسوب‌زدایی، (الف) ایجاد خلأ نسبی، (ب) ایجاد اثر تنش برشی

در رویکرد دوم، انتخاب فرکانس رسوب‌زدایی بر پایه امواج هدایت‌شده فراصوت صورت می‌گیرد. این امواج در لوله‌ها شامل سه مد اصلی طولی (تقارن محوری)، خمشی و پیچشی هستند [۲۰، ۲۱]. در ابعاد متداول لوله و بازه فرکانسی (۲۰-۱۰۰ کیلوهرتز)، سه مد متقارن محوری شامل $L(0,1)$ ، $L(0,2)$ و $T(0,1)$ قابل تحریک‌اند [۲۲]. مدهای متقارن محوری طولی با $L(0,m)$ ، پیچشی با $T(0,m)$ و مد خمشی نامتقارن با $F(n,m)$ نشان داده می‌شوند. تحلیل این مدها نیازمند استخراج منحنی‌های پاشندگی^۱ است که تغییر سرعت موج نسبت به فرکانس را نشان می‌دهد [۲۳]. از میان مدهای به‌دست‌آمده، مد $L(0,1)$ با ماهیت کششی در رسوب‌زدایی مؤثر بوده، در حالی که مد $L(0,2)$ ماهیت خمشی داشته و کاربردی ندارد. بنابراین، فرایند حل مسئله در این پژوهش، بر پایه این رویکرد و برای یک لوله فولادی ۲ اینچ، در چهار گام اجرا می‌شود:

- ۱- تحلیل فرکانسی برای استخراج شکل مد $L(0,1)$ و منحنی‌های پاشندگی در دو حالت مختلف (رسوب ۰/۵ و ۱ میلی‌متر).
- ۲- طراحی مبدل فراصوت توان‌بالا متناسب با فرکانس انتخاب‌شده.
- ۳- طراحی ثابت نگهدارنده مناسب بر اساس منحنی‌های پاشندگی.
- ۴- تحلیل حوزه فرکانس مجموعه لوله، مبدل و ثابت نگهدارنده برای بررسی تنش برشی در سطح مشترک رسوب و جداره لوله.

۳- تحلیل فرکانسی به روش اجزا محدود و استخراج منحنی پاشندگی لوله

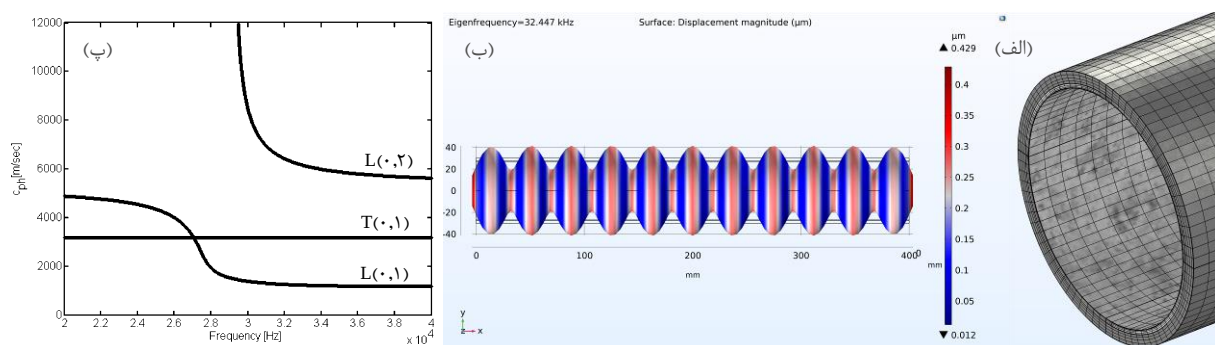
به‌منظور انتخاب فرکانس بهینه رسوب‌زدایی با امواج فراصوت هدایت‌شده، تحلیل فرکانسی لوله فولادی با قطر ۲ اینچ و ضخامت ۲/۷ میلی‌متر در دو حالت دارای رسوب ۰/۵ و ۱ میلی‌متر انجام می‌پذیرد. لایه رسوب از جنس گچ (جدول ۱) در محیط نرم‌افزار کامسول در بازه فرکانسی ۳۰ تا ۴۰ کیلوهرتز مدل‌سازی هندسی و شبکه‌بندی می‌شود (شکل ۲-الف). هدف از تحلیل،

¹ Dispersion curves

شناسایی مد $L(0,1)$ به‌عنوان مد مؤثر در انتقال انرژی صوتی و ایجاد تنش برشی در سطح مشترک رسوب و جداره لوله است. (شکل ۲-ب) با استفاده از روش اجزای محدود نیمه‌تحلیلی^۲ در رابط کاربری گرافیکی امواج هدایت‌شده فراصوت^۳ [۲۴]، منحنی‌های پاشندگی برای هر حالت استخراج می‌گردد (شکل ۲-پ). این رابط کاربری توانایی استخراج ویژگی‌های انتشار موج از جمله سرعت فاز، سرعت گروه، عدد موج و میزان تضعیف را دارد. بر اساس نتایج در میان ۱۰۰ شکل مد برای هر حالت، تنها تعداد محدودی از آن‌ها با ویژگی‌های مد $L(0,1)$ مطابقت داشتند؛ به عبارت دیگر، ۷ شکل مد متناظر مد $L(0,1)$ شناسایی می‌شود (جدول ۲).

جدول ۱. خواص مکانیکی و فیزیکی رسوب (گچ) استفاده شده در تحلیل فرکانسی [۲۵]

نسبت تخلخل	ضریب پواسون	استحکام کششی	چگالی	مدول یانگ	سرعت طولی صوت	سرعت عرضی صوت
۰/۱	۰/۱۵	۴/۰۷ MPa	۱۱۸۹/۶ kg/m ³	۴/۸۳ GPa	۲۰۷۰/۵۴ m/s	۱۳۲۸/۶۴ m/s



شکل ۲. (الف) لوله ۲ اینچ در مازول شبکه‌بندی (ب) شکل مد $L(0,1)$ ، (پ) منحنی پاشندگی مدهای متقارن محوری (رسوب ۰/۵ میلی‌متر)

جدول ۲. نتایج تحلیل فرکانسی انتشار امواج هدایت‌شده فراصوت برای لوله دارای رسوب ۰/۵ میلی‌متر

ردیف	فرکانس‌های شکل مد $L(0,1)$ بر اساس نتایج تحلیل فرکانسی		نتایج بر اساس تحلیل پاشندگی لوله		
	فرکانس ویژه (kHz)	بیشینه جابه‌جایی (μm)	سرعت فازی (m/s)	طول موج (mm)	عدد موج (m/s)
۱	۳۲/۴۴۷	۰/۴۲۹	۱۲۴۲	۳۸/۲۷	۱۶۴/۲
۲	۳۳/۳۵۸	۰/۴۳۰	۱۲۱۷	۳۶/۵۰	۱۷۲/۱
۳	۳۴/۳۶۲	۰/۴۳۳	۱۱۹۹	۳۴/۸۹	۱۸۰/۱
۴	۳۴/۸۳۳	۰/۴۰۹	۱۱۹۲	۳۴/۲۳	۱۸۳/۶
۵	۳۵/۴۶۱	۰/۴۳۴	۱۱۸۵	۳۳/۴۲	۱۸۸/۰
۶	۳۶/۵۶۵	۰/۴۳۶	۱۱۷۶	۳۲/۱۷	۱۹۵/۳
۷	۳۷/۹۴۴	۰/۴۳۸	۱۱۷۰	۳۰/۸۴	۲۰۳/۲

با تکرار مراحل تحلیل برای لوله دارای لایه رسوب با ضخامت ۱ میلی‌متر، تمامی مراحل مشابه حالت قبلی انجام می‌شود و تنها ضخامت لایه رسوب تغییر می‌کند. فرکانس‌های ویژه حاصل از این تحلیل‌ها در بخش تجمیع نتایج، به‌منظور تعیین عرض ثابت نگهدارنده در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

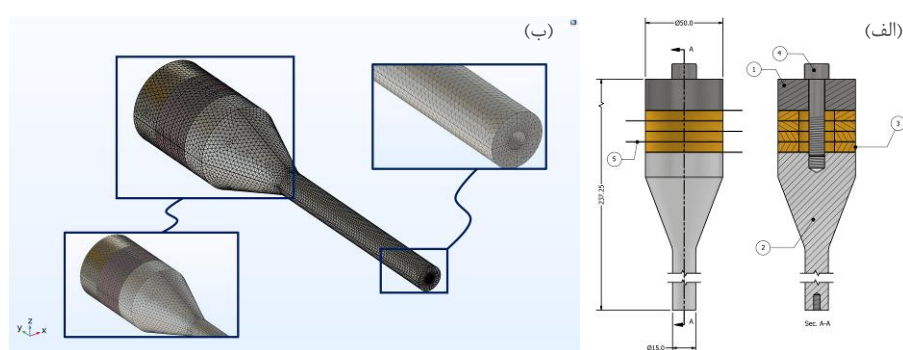
۴- طراحی مبدل فراصوت توان بالا و ثابت نگهدارنده

در بخش قبل، تحلیل فرکانسی و پاشندگی دو حالت لوله فولادی ۲ اینچ (دارای رسوب ۰/۵ و ۱ میلی‌متر) انجام شد. نتایج نشان داد بازه ۳۲ تا ۳۸ کیلوهرتز برای تشدید و انتقال ارتعاشات به لوله و رسوب مناسب است. براین اساس، طراحی مبدل فراصوت

² Sami Analytical Finite Element (SAFE)

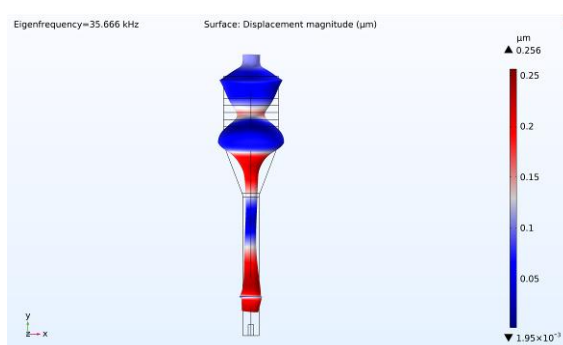
³ GUIGUW (Graphical User Interface for Guided Ultrasonic Waves)

توان بالا باهدف دستیابی به تشدید در این محدوده انجام شد. باتوجه به احتمال تغییرات در مرحله ساخت و آزمون، وجود مد طولی در این بازه معیار اصلی درستی طراحی در نظر گرفته می‌شود. در ساختار مبدل، قطعه پستی از فولاد ضدزنگ، قطعه جلویی از آلومینیوم، سرامیک پیزوالکتریک از نوع PZT-۸، پیچ از فولاد ضدزنگ و الکترود از مس انتخاب شده است. جرم جلویی مبدل شامل هورن فراسوت^۴، نقش کلیدی در افزایش دامنه ارتعاش و انتقال انرژی دارد. دو هندسه رایج هورن، استوانه‌ای و مخروطی هستند. هورن استوانه‌ای با سطح مقطع یکنواخت، ساده و دارای توزیع تنش همگن است اما دامنه ارتعاش کمی ایجاد می‌کند [۲۶]. هورن مخروطی به دلیل کاهش تدریجی سطح مقطع، دامنه ارتعاش بیشتری تولید کرده و برای انتقال انرژی بالاتر مناسب‌تر است [۲۷]. به منظور ترکیب مزایا، کاهش تمرکز تنش در ناحیه اتصال و سهولت ساخت، طرح نهایی (شکل ۳-الف) بر پایه ترکیب هورن استوانه‌ای و مخروطی ارائه شد. این رویکرد، شرایط پایدار برای دستیابی به ارتعاشات مطلوب در بازه مدنظر را فراهم می‌کند.



شکل ۳. مبدل فراسوت توان بالا، (الف) مدل دو بعدی، (ب) شبکه‌بندی

مبدل فراسوت توان بالا باهدف تحریک امواج هدایت‌شده و انتقال انرژی ارتعاشی به لوله فولادی ۲ اینچ طراحی می‌شود. برای تعیین فرکانس تشدید، شبیه‌سازی و تحلیل فرکانسی به روش اجزا محدود در بازه ۳۰ تا ۴۰ کیلوهرتز انجام می‌گیرد. از آنجاکه هسته اصلی مبدل فراسوت را کریستال‌های پیزوالکتریک تشکیل می‌دهند، استخراج و به‌کارگیری دقیق خواص این مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌منظور بررسی حساسیت شبکه‌بندی و اطمینان از استقلال نتایج از اندازه المان‌ها، تحلیل فرکانسی با شبکه‌بندی چهارضلعی آزاد (شکل ۳-ب) در محیط نرم‌افزار کامسول انجام می‌شود. در (شکل ۴) نتیجه تحلیل فرکانسی مبدل نمایش داده شده است. از میان مدهای استخراج‌شده، تنها مد طولی به‌عنوان مد هدف انتخاب می‌شود.



شکل ۴. توزیع جابجایی در فرکانس تشدید مبدل فراسوت توان بالا (۳۵/۶۶ کیلوهرتز)

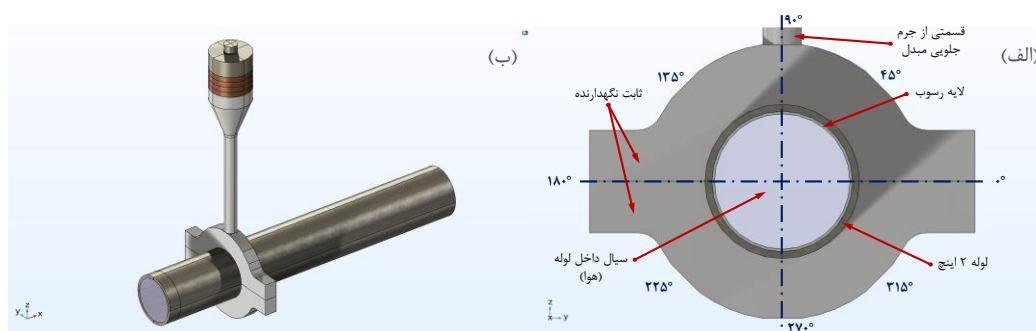
اتصال مستقیم مبدل به سطح منحنی لوله موجب ایجاد فاصله و اتلاف انرژی می‌شود، بنابراین، طراحی ثابت نگهدارنده مناسب برای انتقال مؤثر انرژی ضروری است. بر اساس مبانی صوت‌شناسی، عرض بهینه برابر با نصف طول موج ($\lambda/2$) در نظر گرفته می‌شود.

⁴ Ultrasonic horn

این مقدار تضمین‌کننده تشدید و تداخل سازنده امواج است که موجب بیشینه‌سازی انتقال انرژی مبدل به دیواره لوله و در نهایت به سیال داخلی می‌گردد. در واقع، هنگامی که عرض ثابت نگهدارنده با طول تشدید طبیعی موج ایستاده برابر باشد، ارتعاشات دیواره لوله تقویت شده و کارایی انتقال انرژی فراصوت افزایش می‌یابد. همچنین انعکاس سازنده امواج در لبه‌های ثابت نگهدارنده، از تداخل مخرب جلوگیری کرده و تلفات انرژی را کاهش می‌دهد [۲۸-۳۰]. بر اساس نتایج تحلیل‌های فرکانسی و منحنی‌های پاشندگی مربوط به لوله ۲ اینچ در (جدول ۳)، عرض مناسب ثابت نگهدارنده برابر با ۱۵ میلی‌متر تعیین شد. در طراحی این بخش، قابلیت نصب و جداسازی آسان بر روی نقاط مختلف لوله، تحمل وزن مبدل، و امکان استقرار یک یا چند مبدل در آرایش‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

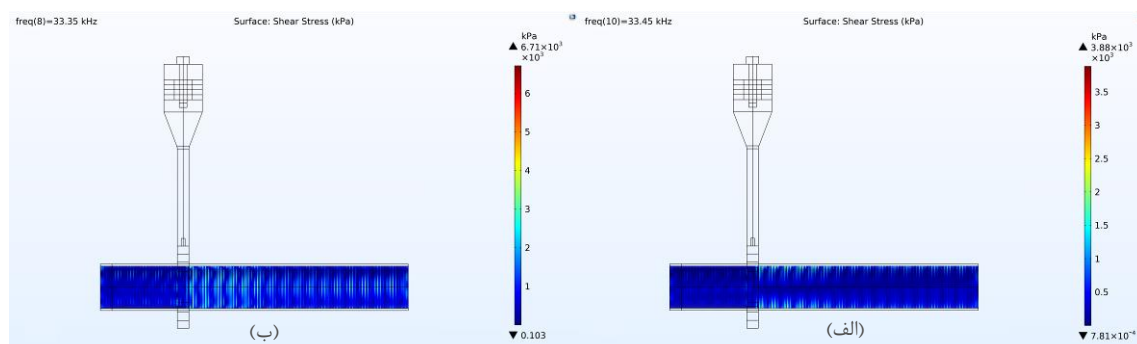
۵- شبیه‌سازی اثر تنش برشی سطح مشترک رسوب و جداره داخلی لوله

نتیجه تحلیل فرکانسی مجموعه شامل لوله، مبدل و ثابت نگهدارنده نشان داد که فرکانس کاری سامانه در بازه ۳۲ تا ۳۳/۵ کیلوهرتز قرار دارد. هدف اصلی در این مرحله، بررسی نحوه نصب و آرایش مبدل بر روی لوله و استخراج توزیع تنش برشی در سطح تماس بین رسوب و جداره لوله است. چیدمان چندمبدل مطابق زوایای فرض شده در (شکل ۵-الف) روی لوله به‌منظور بررسی اثر آن بر توزیع تنش برشی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.



شکل ۵. (الف) اجزای مختلف مجموعه لوله، ثابت نگهدارنده و مبدل فراصوت، (ب) مجموعه لوله دارای رسوب، ثابت نگهدارنده و مبدل فراصوت

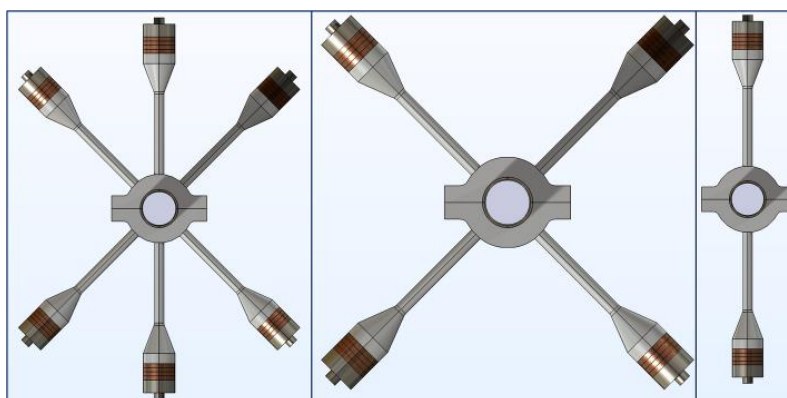
در ادامه، تحلیل رفتار دینامیکی مجموعه شامل لوله، ثابت نگهدارنده و مبدل فراصوت (شکل ۵-ب) در حوزه فرکانس تشدید انجام شده است. در این حالت، مبدل نصب‌شده بر روی ثابت نگهدارنده در فرکانس ۳۳/۴۵ کیلوهرتز تحریک گردید که منجر به تحریک مد $L(0,1)$ و ایجاد میدان تنش برشی در مرز لایه رسوب با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر شد. مطابق نتایج (شکل ۶-الف)، بیشینه تنش برشی برابر با ۳۸۸۰ کیلوپاسکال به‌دست آمد که به‌عنوان آستانه جدایش رسوبات در این شرایط محسوب می‌شود. با تکرار تحلیل برای ضخامت ۱ میلی‌متر، در فرکانس تشدید ۳۳/۳۵ کیلوهرتز، تنش برشی حداکثر ۶۷۱۰ کیلوپاسکال حاصل گردید (شکل ۶-ب).



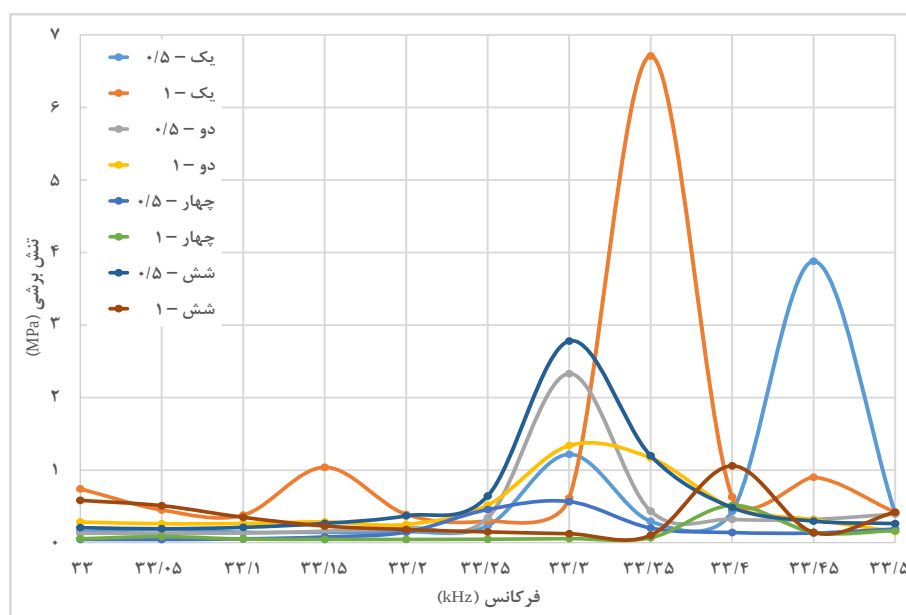
شکل ۶. توزیع تنش برشی بین لایه داخلی لوله و رسوب، (الف) ضخامت ۰/۵ میلی‌متر، (ب) ضخامت ۱ میلی‌متر

تأثیر آرایش و تعداد مبدل‌های فراصوت توان‌بالا بر توزیع تنش برشی بین لایه داخلی لوله و رسوب مطابق (شکل ۷) موردبررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج، در ضخامت رسوب ۰/۵ میلی‌متر، استفاده از یک مبدل بیشترین تنش برشی معادل

۳۸۸۰ کیلوپاسکال را ایجاد کرده است. در پیکربندی دو مبدل، مقدار تنش برشی به ۲۳۳۰ کیلوپاسکال و در آرایش چهار مبدل به ۵۶۷ کیلوپاسکال کاهش یافته است. با افزایش تعداد مبدل‌ها به شش عدد، مقدار تنش برشی به ۲۷۸۰ کیلوپاسکال افزایش یافته که نشان‌دهنده توزیع بهینه‌تر انرژی صوتی و کاهش تداخل مخرب امواج است. در ضخامت رسوب ۱ میلی‌متر، بیشینه تنش برشی در حالت یک مبدل به ۶۷۱۰ کیلوپاسکال رسیده، در حالی که در آرایش‌های چندمبدل کاهش محسوسی مشاهده شده است. مطابق (شکل ۸) نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت رسوب، کارایی آرایش‌های چندمبدل به دلیل تلفات انرژی و تداخل موج کاهش می‌یابد. در مقابل، برای رسوبات نازک، آرایش یک و شش مبدل به ترتیب بیشترین کارایی را دارند. در مجموع، پیکربندی چهار مبدل در هر دو حالت ضخامت کمترین کارایی را نشان داد.



شکل ۷. آرایش تعداد مبدل فراصوت روی لوله، تعداد ۲، ۴ و ۶ مبدل



شکل ۸. توزیع تنش برشی بین لایه داخلی لوله و رسوب

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی کارایی رسوب‌زدایی با استفاده از امواج فراصوت توان بالا، رفتار دینامیکی یک لوله فولادی دو اینچ در شرایط مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی در محیط کامسول نشان داد که فرکانس‌های تشدید مجموعه در محدوده ۳۳ تا ۳۴ کیلوهرتز قرار داشته و مد غالب تحریک‌شده از نوع طولی $L(0,1)$ است. با طراحی ثابت نگهدارنده مناسب و اعمال تحریک در فرکانس تشدید، میدان مؤثر تنش برشی در سطح مشترک بین لایه رسوب و جداره داخلی لوله ایجاد

گردید. بررسی تأثیر ضخامت رسوب نشان داد که افزایش ضخامت از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر موجب افزایش فرکانس تشدید و کاهش یکنواختی توزیع انرژی می‌شود. همچنین تحلیل اثر تعداد مبدل‌ها بیانگر آن است که آرایش تک‌مبدل بیشترین میزان تنش برشی (تا ۶۷۱۰ کیلوپاسکال) را ایجاد کرده و در آرایش‌های چندمبدل، به دلیل تداخل امواج و تغییر در الگوی مد، کارایی کاهش می‌یابد. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که انتخاب فرکانس تشدید دقیق و طراحی مکانیکی بهینه ثابت نگهدارنده، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش بازده رسوب‌زدایی فراصوتی و تمرکز انرژی صوتی در ناحیه هدف دارد.

مراجع

1. K. Teng et al., "Calcium carbonate fouling on double-pipe heat exchanger with different heat exchanging surfaces," Powder Technology, vol. 315, pp. 216-226, 2017.
2. T. R. Bott, Fouling of heat exchangers. Elsevier, 1995.
3. K.R. Lohr and J.L. Rose, "Ultrasonic guided wave and acoustic impact methods for pipe fouling detection," Journal of food engineering, vol. 56, no. 4, pp. 315-324, 2003.
4. N. Nakagawa et al., "Removal of pipe fouling inside pipes using ultrasonic waves," JSME Journal, vol. 49, no. 3, pp. 713-718, 2006.
5. G. Wilkinson and C. Bridge, "Automatic multiple cleaning pig launching system passes test," Pipeline Gas Journal, vol. 238, pp. 44-45, 2011.
6. P. R. Gogate, "Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: a critical review," Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, vol. 47, no. 4, pp. 515-527, 2008.
7. M. Pohanka et al., "The Effect of Water Jet Overlaps in a Descaler on the Quality of Surface of the Hot Rolled Steel," Metals, vol. 13, no. 10, 2023.
8. T. Mason, "Ultrasonic cleaning: An historical perspective," Ultrasonics sonochemistry, vol. 29, pp. 519-523, 2016.
9. L.M. Carrillo-Lopez et al., "High intensity ultrasound homogenizes and improves quality of beef longissimus dorsi," Food Science Technology, vol. 39, pp. 332-340, 2018.
10. Z. Qu et al., "A descaling methodology for a water-filled pipe based on leaky guided ultrasonic waves cavitation," Chemical Engineering Research Designs, vol. 146, pp. 470-477, 2019.
11. S. Li et al., "Environmentally friendly methodology for fouling removal in pipeline based on leaky guided wave generated by quasi-axisymmetric excitation mode," Clean Technologies, vol. 21, pp. 481-491, 2019.
12. Z. Qu et al., "Methodology for removing fouling within liquid-filled pipelines based on ultrasonic guided waves cavitation effect," Applied Acoustics, vol. 157, 2020.
13. M. Huang et al., "Influence of temperature on fouling removal for pipeline based on eco-friendly ultrasonic guided wave technology," Clean Technologies, vol. 25, 2022.
14. Z. Qu et al., "The effect of bubble size in descaling process of bubble flow pipes based on leaky ultrasonic guided waves," Desalination, vol. 564, p. 116805, 2023.
15. M. Järvinen et al., "Understanding the delivery of ultrasonic cleaning effect in a heat exchanger tube," aquatic, vol. 2, p. 3, 2024.
16. T. Ma and H. Wang, "Simulation of the shear effect in the ultrasonic descaling of the heat exchanger which produces viscoelastic soft scale," in IOP Conference Series, 2021, vol. 687, no. 1: IOP Publishing, p. 012035.
17. S. Lu et al., "Finite Element Simulation of the Shear Effect of Ultrasonic on Heat Exchanger Descaling," in IOP Conference Series, vol. 322, no. 4, 2018.
18. C. Yin et al., "Numerical simulation and experimental validation of ultrasonic de-icing system for wind turbine blade," Applied Acoustics, vol. 114, pp. 19-26, 2016.
19. J. L. Palacios et al., "Ultrasonic shear wave anti-icing system for helicopter rotor blades," in Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society, 2006.
20. A. H. Meitzler, "Mode coupling occurring in the propagation of elastic pulses in wires," The journal of the acoustical society of America, vol. 33, no. 4, pp. 435-445, 1961.
21. M. Silk and K. Bainton, "The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to Lamb waves," Ultrasonics, vol. 17, no. 1, pp. 11-19, 1979.
22. P. S. Lowe et al., "Inspection of cylindrical structures using the first longitudinal guided wave mode in isolation for higher flaw sensitivity," IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 3, pp. 706-714, 2015.
23. J. Rose, "Ultrasonic waves in solid media," ed. Cambridge University Press, Cambridge, 2014.

24. A. Marzani et al., "A software for the computation of acoustic waves in cylindrical, plate and arbitrary cross-section waveguides," in Attidella 13a Congresso Nazionale sulle prove non distruttive Monitoraggio e diagnostica AIPnD, Roma, Italia, 2009, pp. 1-9.
۲۵. ا. بهرامی خمسلویی، م. ح. سورگی و س. موسوی ترشیزی، "شبیه‌سازی تشخیص رسوب گرفتگی لوله کندانسور به‌وسیله امواج هدایت شده فراصوتی"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران، ۱۳۹۵.
26. M. R. Rani and R. Rudramoorthy, "Computational modelling and experimental studies of the dynamic performance of ultrasonic horn profiles used in plastic welding," *Ultrasonics*, vol. 53, no. 3, pp. 763-772, 2013.
27. K. H. Mughal et al., "Numerical evaluation of state-of-the-art horn designs for rotary ultrasonic vibration assisted machining of Nomex honeycomb composite," 2021.
28. D. Guo and T. Kundu, "A new transducer holder mechanism for pipe inspection," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, no. 1, pp. 303-309, 2001.
29. L. Smith et al., "Transducer design for clamp-on guided wave flow measurement in thin-walled pipes," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 11, pp. 10613-10619, 2022.
30. K. Shivaraj et al., "Ultrasonic circumferential guided wave for pitting-type corrosion imaging at inaccessible pipe-support locations," 2008.